

CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE UM AÇO MICROLIGADO AO NÍOBIO PARA VERGALHÃO DE CONSTRUÇÃO CIVIL*

Ana Clara Fonseca da Silva¹

Tiago Seixas Bittencourt²

Fabiane Roberta Freitas da Silva³

Andre Luiz Vasconcellos da Costa e Silva⁴

Resumo

Aços para vergalhões são especificados pelas propriedades mecânicas. Os desenvolvimentos, nestes aços, são, em geral, focados no projeto de composições químicas e ciclos de processamento que resultem em custo mínimo, e conformidade com os requisitos. Uma opção interessante é o uso de microligas. Elementos como V e Nb tem sido usados. Nb, em particular, pode contribuir para melhorar as propriedades no ensaio de tração através do refino do grão austenítico, endurecimento por precipitação na ferrita e por aumento da temperabilidade. Neste trabalho é apresentado o primeiro estágio do projeto de liga e caracterização de um aço microligado ao Nb para esta aplicação. O aço atendeu a especificação visada. Observou-se refino de grão austenítico em relação a composição usual para esta aplicação, sem mudança no processamento termomecânico. Os resultados indicam que o uso do Nb como microligante tem bom potencial para a aplicação e que, possivelmente, propriedades ainda melhores podem ser obtidas com a otimização do ciclo de processamento. São indicadas as próximas etapas da caracterização.

Palavras-chave: Níobio; Solubilização; Precipitação; Vergalhão.

PRELIMINARY CHARACTERIZATION OF NIOBIUM MICROALLOYED STEEL REINFORCING BARS

Abstract

Reinforcing steel bars are usually specified based on mechanical properties. Most developments, in these steels, are usually focused on alloy and process design to reach minimum cost and conformity to specification. In this respect, microalloying is an interesting option. Elements as V and Nb have been used in rebar. Niobium can contribute to improvement in tensile properties through austenitic grain size control during hot working, precipitation hardening due to carbonitrides or clusters, and hardenability increase. In the present work the first stage in the alloy design and characterization of a Nb microalloyed steel for rebars is presented. The designed steel has fulfilled the required specification. Significant austenitic grain size refining – when comparing with the “basic composition” normally used was observed, even without any change in the thermomechanical processing cycle. Results indicate that Nb has a good potential as microalloying element in rebars. Improved results may be obtained with process development. The next stages in characterization are discussed.

Keywords: Niobium; Solubilization; Precipitation; Steel Rebar.

¹ Graduanda em Eng. Metalúrgica, Estagiária, EEIMVR-UFF, CSN, Volta Redonda, RJ

² Eng. Metalúrgico, M.Sc., Coordenador Técnico da Qualidade, CSN, Volta Redonda, RJ.

³ Eng. Metalúrgica, D.Sc. Prof. Adjunta, EEIMVR-UFF, Volta Redonda, RJ

⁴ Eng. Metalúrgico, Ph.D, Prof. Titular, EEIMVR-UFF, Volta Redonda, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Vergalhões especificados conforme a norma NBR 7480 [1] devem atender especialmente a requisitos de propriedades mecânicas a tração, propriedades tecnológicas (especialmente dobramento). Não são estabelecidos requisitos de composição química, exceto nos casos em que soldabilidade é assegurada (como na NBR 8965[2]). A produção de vergalhões com custo otimizado depende, portanto, de um balanço entre a composição química visada pela aciaria e as condições de laminação e resfriamento aplicadas ao produto. O uso de elementos microligantes é uma das opções importantes no projeto da composição química destes materiais. Microligantes como vanádio, titânio e nióbio tem diferentes efeitos nos aços e seu uso deve ser combinado com o processamento adequado. De forma geral, adições nas faixas usuais de vanádio resultam em endurecimento por precipitação. Adições de titânio e nióbio podem ser úteis no controle do tamanho de grão austenítico. Carbonitreto de titânio podem controlar o tamanho de grão quando a austenitização é realizada a temperaturas elevadas e os carbonitreto de nióbio podem ser efetivos no controle do tamanho de grão austenítico durante o processo de laminação.

As temperaturas de austenitização na laminação de vergalhões são definidas pelo programa de deformação previsto e pela necessidade de processar o material continuamente, desde a saída do forno de aquecimento até o leito de resfriamento ou formador de espiras em função da embalagem final do material, sem interrupções. Nestas condições, as temperaturas de austenitização são relativamente baixas e o uso de titânio não é especialmente efetivo. Desta forma, vanádio e nióbio são as microligas mais adequadas a serem consideradas na produção de vergalhões para a construção civil.

Neste trabalho, é apresentada uma caracterização preliminar de um aço microligado ao nióbio para a produção de vergalhões para a construção civil. Nesta etapa da caracterização, visou-se avaliar a compatibilidade de uma composição química simulada via termodinâmica computacional e parâmetros de processamento termomecânico controlados. A simulação da composição do aço levou em conta tanto com respeito a solubilização e reprecipitação de carbonitreto a partir do forno de aquecimento como com respeito ao potencial de segregação e formação de carbonitreto grosseiros. Nesta etapa, a caracterização limitou-se a microscopia ótica, eletrônica de varredura, ensaios mecânicos e tecnológicos. Os resultados mostram que o aço microligado ao nióbio tem tamanho de grão austenítico razoavelmente fino, e microestrutura constituída de ferrita e perlita, com agregados de ferrita e carbonetos, atendendo ao grau CA-50 da NBR 7480.

2 CONTROLE DA MICROESTRURA EM AÇOS PARA VERGALHÕES

As microestruturas usuais em vergalhões para a construção civil são obtidas, normalmente, com resfriamento acelerado após a conclusão da laminação a quente. Dois processos mais comuns são Tempcore® e Stelmor®. O primeiro envolve resfriamento mais rápido, com a formação de uma camada martensítica na região superficial e o segundo resfriamento com ar forçado, resultando usualmente em microestruturas compostas por ferrita pró-eutectóide e perlita ou outros agregados de ferrita e carbonetos (+C, aqui incluída bainita) [3].

Nestas microestruturas, as propriedades mecânicas são controladas, principalmente, pelo tamanho de grão ferrítico, fração volumétrica de perlita (ou agregado F+C), e espaçamento interlamelar da perlita [4,5]. A estratégia para o controle destas microestruturas no processo Stelmor® consiste, basicamente de (a) controle da

velocidade de resfriamento para cada diâmetro de barra a produzir (b) emprego de elementos de liga que retardem a decomposição difusiva da ferrita para favorecer nucleação farta e conseqüentemente tamanho de grão fino [5,6](c) balanço entre velocidade de resfriamento e composição química que permita a formação de frações volumétricas de perlita superiores às de equilíbrio [6] (d) controle do tamanho de grão austenítico e, grau de recristalização, para favorecer a nucleação farta na transformação difusiva, resultando em tamanho de grão fino [4,7,8].

Enquanto as opções de (a) a (c) são normalmente exploradas pelo ajuste controlado dos teores de C, Mn e Si, e eventualmente, aproveitando os benefícios dos residuais presentes na sucata (Cr, Ni, Cu e Mo, principalmente) a opção (d) não é facilmente aproveitada, em decorrência das características da laminação destes produtos. Enquanto na laminação a quente de planos e no forjamento é possível programar, se necessário, a realização de deformações elevadas a temperaturas relativamente baixas, a laminação de longos se passa sem interrupções nas várias cadeiras e deve permitir que o material laminado chegue ao fim da deformação na temperatura adequada para o início do resfriamento acelerado. Assim, é difícil controlar a recristalização na laminação de vergalhões somente pela combinação de temperatura e deformação (“laminação controlada”) [8,9]. A solução clássica para o controle do tamanho de grão austenítico na conformação a quente, desde a década de 1960, é o emprego de elementos microligantes [9]. Em particular, o uso de nióbio e dispersões de carbonitretos de nióbio tem provado ser uma estratégia extremamente eficaz no controle do tamanho de grão austenítico, na laminação [10]. Dispersões finas de carbonitretos de nióbio são eficazes no controle do tamanho de grão austenítico e nióbio em solução e sua precipitação podem retardar a recristalização da austenita [10-13].

O aproveitamento clássico do Nb envolva a solubilização completa dos carbonitretos durante o aquecimento para a laminação. No caso dos aços para vergalhão isto nem sempre é possível em vista dos teores de carbono adotados e da temperatura de reaquecimento, definida, também, pela necessidade de atingir o fim da laminação com a temperatura adequada. Ainda assim, tem sido demonstrado que o uso do Nb pode ser favorável para o controle de grão austenítico destes aços [14-16]. Além disto, quando um quantidade suficiente de Nb em solução chega ao final da laminação, há a possibilidade de ocorrer aumento de temperabilidade [17,18], precipitação de carbonitretos na ferrita durante ou após a decomposição da austenita [19,20] ou a formação de “clusters” ricos em Nb e C na ferrita [20,21].

Assim, no presente trabalho, objetivou-se avaliar a compatibilidade de uma composição química simulada via termodinâmica computacional e parâmetros de processamento termomecânico controlados com a microestrutura desejada. A simulação da composição do aço levou em conta tanto com respeito a solubilização e re-precipitação de carbonitretos a partir do forno de reaquecimento como com respeito ao potencial de segregação e formação de carbonitretos grosseiros [22]. Neste trabalho são apresentados os resultados destas simulações e de parte da caracterização de um aço microligado ao Nb. As propriedades são comparadas aquelas obtidas em um aço usual para vergalhão. A caracterização aqui apresentada envolve microscopia ótica, eletrônica de varredura, ensaios mecânicos e tecnológicos. Os resultados mostram que o aço microligado ao nióbio tem tamanho de grão austenítico razoavelmente fino, e microestrutura constituída de ferrita e perlita, com agregados de ferrita e carbonetos, atendendo ao grau CA-50 da NBR 7480.

3. MATERIAIS E METODOS

3.1 Os aços estudados

Foram analisados dois aços, um contendo Nióbio (NB) e o outro sem adição deste elemento de liga (NA), produzido normalmente para a especificação CA-50. Ambos tem faixas de C, Mn e Si próximas. A faixa de composição química dos aços, para estes elementos, é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1. Composição Química básica dos aços avaliados neste estudo.

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Microligas
NA	0,33-0,37	1,10-1,25	0,10-0,25	V (%) 0.20 max.
NB	0,34-0,38	1,10-1,25	0,10- 0,25	Nb (%) 0,02- 0,03

3.2 Metalografia

A preparação metalográfica das amostras para metalografia ótica e MEV foi feita com lixamento e polimento e ataque com nital 2% ou picral. Para medida do tamanho de grão foi utilizado o Método de interceptos de Abrams segundo a norma ASTM E112 (23). A determinação da fração volumétrica (V_V) de fases e constituintes foi feita por meio do software ImageJ, com base na fração em área (S_S). Foi empregado um MEV Quanta 3DFeg equipado com espectrometria EDS Trident da Edax.

3.4 Termodinâmica Computacional

Para todos os cálculos foi empregado o software Thermo-calc [24] e o banco de dados TCFE7 [25].

3.5 Ensaios Mecânicos

As amostras foram coletadas durante o processo de Laminação Experimental. Foram realizados Ensaios de Tração segundo a Norma NBR 6892.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação Termodinâmica

A Figura 1 apresenta as frações de fases presentes, em equilíbrio, no aço NB, em função da temperatura. Observa-se que a dissolução completa do carbonitreto de Nb (FCC#2, no gráfico) ocorre a 1190°C.

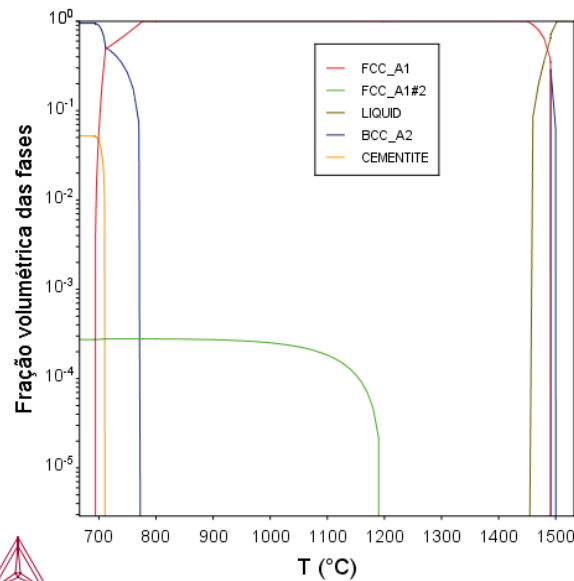


Figura 1. Fração molar de fases presentes em equilíbrio no aço NB (composição visada) em função da temperatura.

A Figura 2 mostra que o composto formado é, uma carbonitreto, em função dos teores usualmente altos de N em aços produzidos em Forno Elétrico a Arco.

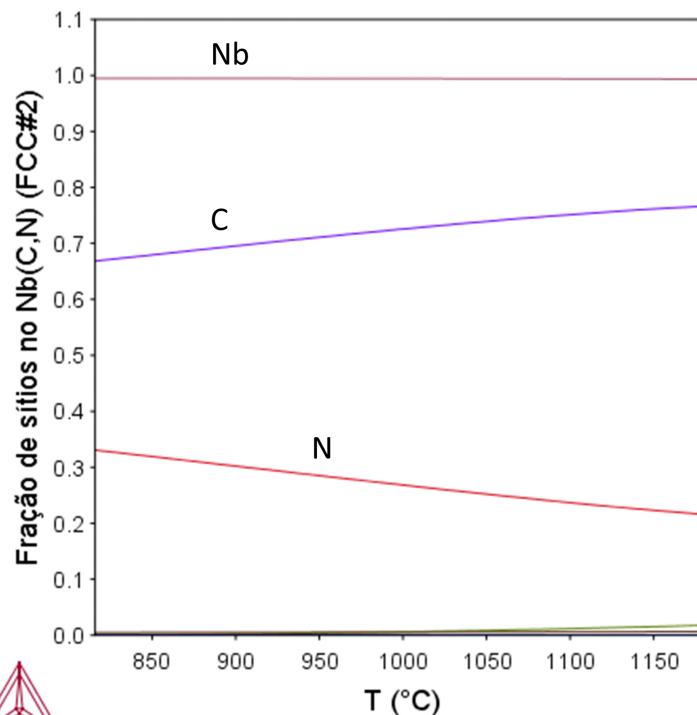


Figura 2. Fração de sítios ocupados na fase Nb(C,N), em equilíbrio, em função da temperatura.

A temperatura usual para o enformamento, na laminação a quente, é de 1140°C, em função do ciclo termomecânico completo. Cálculos adicionais foram realizados para suportar o projeto da liga. O efeito da variação dos teores de C e Nb sobre a fração volumétrica do carbonitreto Nb(C,N) e sobre o teor de nióbio em solução na austenita foi estimado e é apresentado nas Figuras 2 e 3. O aumento do teor de C e de Nb no aço levam a diminuição do Nb em solução na austenita (Figura 2a). O aumento do teor de C no aço aumenta a fração volumétrica de Nb(C,N) não dissolvido. O

aumento do teor de Nb, por outro lado, tem pouco efeito sobre a fração não dissolvida, para os teores de C estudados (Figura 2b).

Escolhido um teor de Nb visado, é possível calcular o efeito do C sobre a quantidade de Nb em solução na austenita, em equilíbrio (Figura 2c). Por fim, definidas as faixas dos elementos visados no aço (C, Mn, Si e Nb) e a variação de processo na temperatura do forno de reaquecimento, é possível avaliar a dispersão esperada no teor de Nb em solução na austenita, em equilíbrio, pelo método de Monte-Carlo (Figura 2c). Estes cálculos permitiram a definição da composição visada para o aço, com as condições de reaquecimento dos tarugos definida.

30°C)

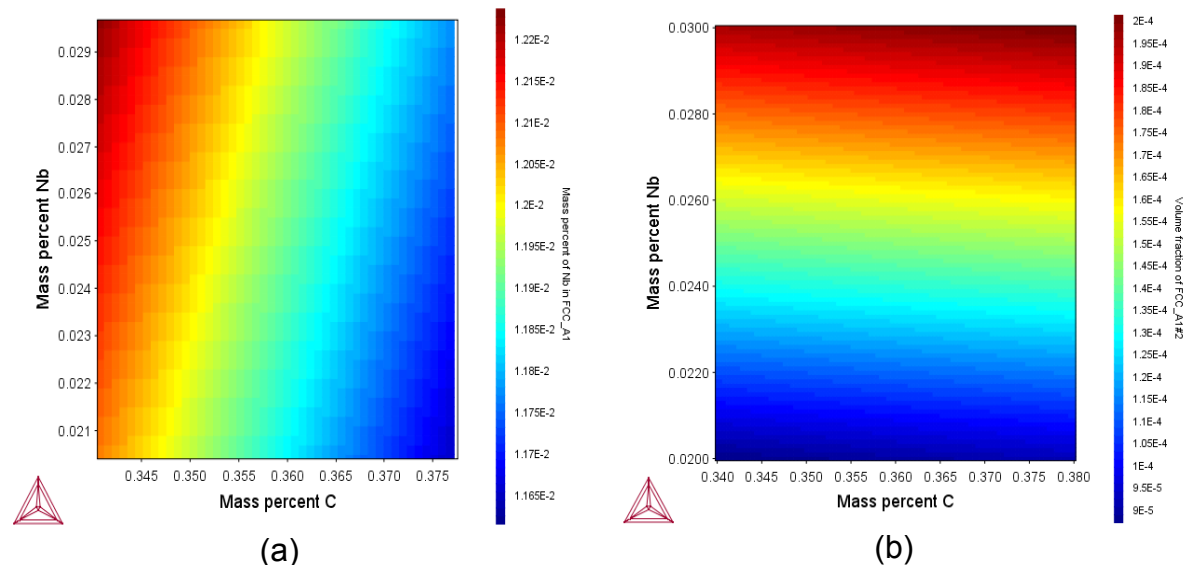


Figura 2. (a) Teor de Nb (%) em solução na austenita, em equilíbrio, a 1140°C, em função dos teores de Nb e C no aço. (b) Fração volumétrica de Nb(C,N) não dissolvido, em equilíbrio, a 1140°C, em função dos teores de Nb e C no aço.

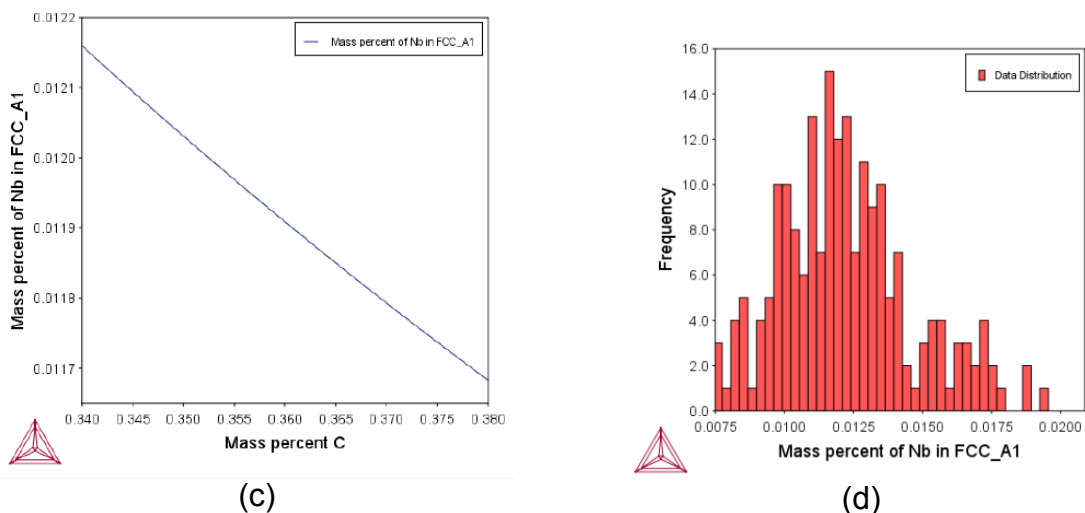


Figura 3. (a) Teor de Nb (%) em solução na austenita, em equilíbrio, a 1140°C, para o teor de Nb visado selecionado, em função dos teores de C no aço. (b) Distribuição de frequência dos teores de Nb em solução na austenita em equilíbrio para a variação permitida para os teores de C, Mn e Si e para a temperatura do forno de reaquecimento.

Após a definição da composição química visada os aços foram elaborados, lingotados em tarugos de 145mm e laminados para vergalhões de 10mm de

diametro, com resfriamento controlado no Stelmor. Amostras removidas dos vergalhões acabados foram amostradas para caracterização.

4.2 Ensaios Mecânicos

Para determinação das propriedades mecânicas foi realizado ensaio de tração segundo a Norma NBR 6892. Os resultados estão apresentados na Tabela 4 e atendem aos requisitos da norma NBR 7480 para CA-50. Pode-se notar que para os dois aços estudados, os resultados de propriedades mecânicas são similares.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração do produto laminado

Amostra	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	Relação Elástica (LE/LR)	Dobramento
NBR 7480	≥500	≥1,08xLE	≥8	≤0,93	3φ
NA	539	741	14	0,73	OK
NB	535	715	14	0,75	OK

Os valores especificados na norma foram atendidos com segurança. Observa-se que a relação elástica do aço NB foi algo superior a do aço NA.

4.3 Caracterização Estrutural

4.3.1 Macroestrutura

A macroestrutura dos tarugos foi avaliada através de exame macrográfico, não tendo sido observadas diferenças relevantes entre os dois aços, que foram lingotados nas mesmas condições.

4.3.2 Microestrutura

A Figura 3 apresenta o aspecto micrográfico dos aços NA e NB. A microestrutura é composta por ferrita alotriomórfica e colônias de perlita. O aço NB aparenta maior fração volumétrica de perlita. O padrão de resfriamento no Stelmor não foi alterado nesta etapa do desenvolvimento.

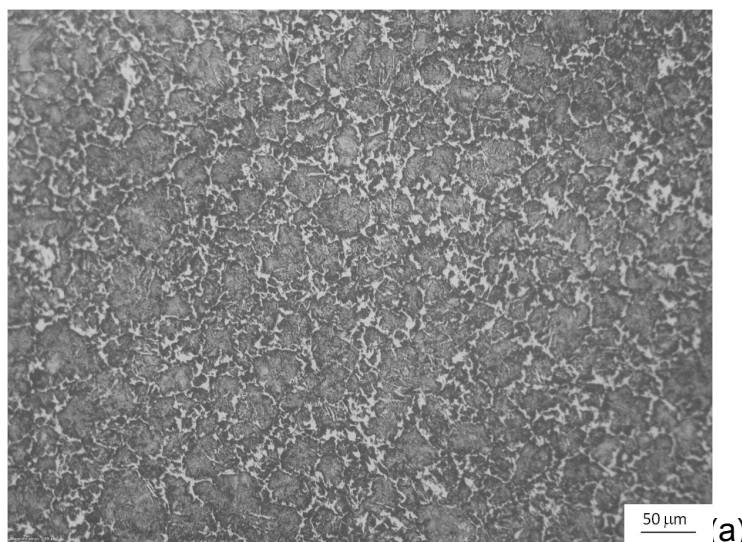


Figura 2a. Aço NA, microscopia ótica, seção transversal, 1/2 raio, material acabado.

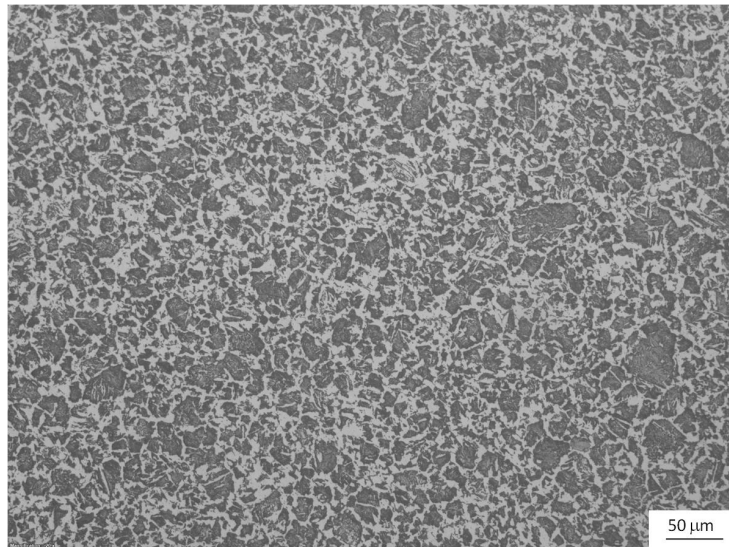


Figura 3b. Aço NB, microscopia ótica, seção transversal, ½ raio, material acabado.

A fração volumétrica de perlita foi determinada quantitativamente. O tamanho de grão austenítico prévio foi estimado considerando que, nos dois aços, a ferrita alotriomórfica teria sido nucleada somente nos contornos de grão austenítico prévios. Assim, a ferrita delinear os contornos de grão austeníticos. O aço com adição de Nb (NB) apresentou menor fração volumétrica de perlita e menor Tamanho de Grão quando comparado com o aço utilizado como referência para o estudo (NA).

Tabela 3. Fração Volumétrica de perlita e estimativa do tamanho de grão austenítico prévio.

Aço	Tamanho de Grão (μm)	Fração Volumétrica (%)
NA	14,91±1,21	56,73±0,04
NB	10,77±0,57	46,19±0,03

Para composições base equivalentes e uma mesma velocidade de resfriamento no final da laminação, a maior fração volumétrica de perlita do aço NA indica um retardo na formação de ferrita proeutectoide ou a entrada a temperaturas mais altas no campo de estabilidade da ferrita e da cementita(6). Isto pode estar associado a menor nucleação de ferrita proeutectoide, consistente com o maior tamanho de grão. É possível, também, que a composição química do aço NA resulte em retardo nas transformações difusivas, uma vez que não é esperada a precipitação significativa de carbonitretos. O menor tamanho de grão austenítico no aço NB é consistente com possível efeito do Nb em solução durante a laminação a quente. Para otimizar o projeto da liga pode ser necessário alterar a velocidade de resfriamento no Stelmor para compensar a maior nucleação associada ao grão austenítico mais fino e possível diferença de temperabilidade entre os aços.

O aço NB foi ainda analisado em MEV para avaliar a presença (ou não) de carbonitretos grosseiros provenientes da segregação [22] e para uma caracterização preliminar de parâmetros microestruturais. A Figura 4 apresenta o aspecto da microestrutura observada no MEV. Observa-se, em alguns locais, a presença de carbonitretos mais grosseiros (dimensões da ordem de micrometros) frequentemente associados a inclusões de sulfetos. Estes carbonitretos devem ter precipitado durante a solidificação, devido a segregação. Em vista de suas dimensões, não foram dissolvidos nas etapas posteriores do processamento. O nióbio contido

nestes precipitados é praticamente indisponível para afetar as propriedades mecânicas do aço NB.

Observou-se, no aço NB, além de perlita, alguns agregados de ferrita e carbonetos de caracterização menos evidente. Estes constituintes estão sendo caracterizados de forma mais detalhada, inclusive com medidas de microdureza, assim como a estrutura do aço NA.

O espaçamento interlamelar da perlita no aço NB foi estimado de forma preliminar, através da medida do espaçamento das colônias mais finas em $0,08\mu\text{m}\pm 0,05$. Embora este método não seja exatamente correto [26] é rápido e permite uma avaliação preliminar. A estimativa mais correta [26] do espaçamento das lamelas de perlita está sendo realizada, com o objetivo de testar-se ou ajustar-se relações empíricas para as propriedades mecânicas, como proposto por Honeycombe [4].

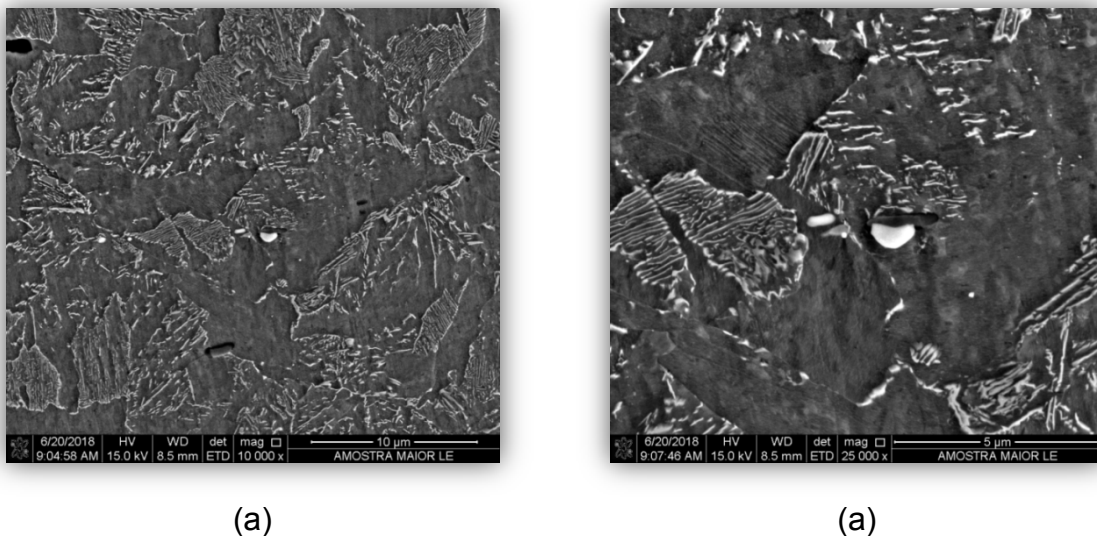


Figura 4. Microestrutura do aço NB. MEV, SE. Presença de perlita e agregados de ferrita e carbonetos. A fase clara, no centro da imagem é um carbonitreto de Nb.

A dureza da perlita foi medida nos dois aços. Os resultados são apresentados na Tabela 4. A comparação estatística indica que não há diferença significativa entre a dureza da perlita nos dois aços. Isto indica que, possivelmente, aumentando-se a fração volumétrica de perlita no aço NB, será possível obter maiores resistências do que no aço inicialmente testado. Naturalmente estas observações são parte do processo de desenvolvimento da liga, ainda em andamento.

Tabela 4. Microdureza da perlita nos aços em estudo (média de 10 medidas e desvio padrão)

Aço	Dureza HV10
NA	235,6±12,6
NB	237,4±10,7

5. CONCLUSÕES

Uma composição diretriz inicial para o desenvolvimento de um aço para vergalhão CA-50 empregando Nb foi projetada com apoio da termodinâmica computacional. O teste inicial indicou que é possível produzir este grau satisfatoriamente com o aço projetado. O uso do Nb promoveu refino de grão austenítico, mesmo com a temperatura de enformamento relativamente baixa e, possivelmente, dissolução incompleta dos carbonitretos. Embora favorável para as propriedades mecânicas, o

refino de grão favorece, na composição projetada, a nucleação de ferrita pró-eutectoide, reduzindo a fração volumétrica de perlita. Após o ajuste da composição química com base neste teste inicial será estudado o efeito da velocidade de resfriamento no leito Stelmor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional – CSN e a Universidade Federal Fluminense-UFF pelo desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

1. ABNT. ABNT NBR 7480:2007 Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. São Paulo; 2007.
2. ABNT. ABNT NBR 8965:1985 Barras de aço CA 42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado - Especificação. São Paulo; 1985.
3. Colpaert H, Costa e Silva A. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4^o ed. São Paulo: Editora Blucher; 2008. 672 p.
4. Honeycombe RW. Steels: Microstructure and Properties. London: Edward Arnold; 1981.
5. Pickering FB, organizador. Constitution and properties of steels. Vol. 7. New York: Wiley-VCH; 1996.
6. Porter DA, Easterling KE. Phase transformations in metals and alloys. 2nd. London: Chapman & Hall; 1992.
7. Reed-Hill RE, Abbaschian R. Physical Metallurgy Principles. 3rd ed. Boston: PWS-Kent; 1992.
8. Krauss G. Steels: Processing, Structure and Performance. Materials Park: ASM International; 2005.
9. Kozasu I. Processing- Thermomechanical controlled processing. In: Pickering FB, ed. Materials Science and Technology- Constitution and Properties of Steels. New York: Wiley-VCH; 1996.
10. Deardo AJ. Niobium in modern steels. Int Mater Rev. 2003;48(6):371–402.
11. Palmiere EJ, Garcia CI, DeArdo AJ. The influence of niobium supersaturation in austenite on the static recrystallization behavior of low carbon microalloyed steels. MetMat Trans A. 1996;27(4):951–960.
12. Hansen SS, Sande JBV, Cohen M. Niobium carbonitride precipitation and austenite recrystallization in hot-rolled microalloyed steels. Met Trans A. 1980;11(3):387–402.
13. Dutta B, Sellars CM. Effect of composition and process variables on Nb(C, N) precipitation in niobium microalloyed austenite. Mat Sci and Tech. 1987;3(3):197–206.
14. Medina SF, Quispe A, Valles P, Baños JL. Recrystallization-Precipitation Interaction Study of Two Medium Carbon Niobium Microalloyed Steels. ISIJ International. 1999;39(9):913–22.
15. Hashimoto S, Nakamura M. Effects of Microalloying Elements on Mechanical Properties of Reinforcing Bars. ISIJ International. 2006;46(10):1510–5.
16. Oliveira F, Lino R, Barbosa R. Mathematical Model of Microstructural Evolution of Hot Rolled Wire Rods for Nb Microalloyed Steels. Mat Sci Forum. 2016;879:181–186.
17. Fossaert C, Rees G, Maurickx T, Bhadeshia HKD. The effect of niobium on the hardenability of microalloyed austenite. Met Mat Trans A. 1995;26A(January):21–30.
18. Jia T, Militzer M. The Effect of Solute Nb on the Austenite-to-Ferrite Transformation. Met Mat Trans A. 2015;46(2):614–21.
19. Kestenbach H-J. Dispersion hardening by niobium carbonitride precipitation in ferrite. Mat Sci and Tech. 1997;13(9):731–9.

20. Pereloma E, Timokhina I, Russell K, Miller M. Characterization of clusters and ultrafine precipitates in Nb-containing C–Mn–Si steels. *Scripta Mater.* 2006;54(3):471–6.
21. Xie KY, Zheng T, Cairney JM, Kaul H, Williams JG, Barbaro FJ, et al. Strengthening from Nb-rich clusters in a Nb-microalloyed steel. *Scripta Mater.* 2012;66(9):710–3.
22. Escobar DP, Castro CSB, Borba EC, Oliveira AP, Camey K, Taiss E, et al. Correlation of the Solidification Path with As-Cast Microstructure and Precipitation of Ti,Nb(C,N) on a High-Temperature Processed Steel. *Met Mat Trans A.* [citado 19 de junho de 2018]; Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-018-4717-x>
23. ASTM. ASTM E112-96(2004)e2 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2004;
24. Sundman B, Jansson B, Andersson JO. The Thermo-Calc databank system. *CALPHAD.* 1985;9:153–90.
25. TCAB. TCFE7 Database. Stockholm: TCAB; 2012.
26. Vort GV, Roosz A. Measurement of interlamellar spacing of pearlite. *Metallography.* 1984;17:1–17.